

文章编号: 1001-0920(2008)02-0162-05

基于 Gabor 小波的目标跟踪方法研究

邢卓异, 朱齐丹, 林 壮

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对利用 Gabor 小波进行目标识别的过程中参数序列过多的问题, 提出一种新的参数组合选取原则. 该方法利用 Gabor 小波参数特性, 配合能量函数构成图像的特征点集合. 同时提出了基于统计模型的自适应非线性滤波算法, 以弥补基本统计模型下卡尔曼滤波算法的缺陷, 配合 Gabor 小波特征点集合能够大大减少特征点序列过多所造成的算法耗时问题. 仿真和实验表明, 该算法可广泛应用于各种图像目标识别与跟踪的系统中, 并具有良好的图像目标识别能力.

关键词: Gabor 小波; 目标跟踪; Gabor 参数选择; 卡尔曼滤波

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Target recognizing and tracking algorithm based on Gabor wavelet

XING Zhuo-yi, ZHU Qi-dan, LIN Zhuang

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China. Correspondent: XING Zhuo-yi, E-mail: xingzhuoyi@yahoo.com.cn)

Abstract: To improve too many parameters of Gabor wavelet, a new algorithm for choosing target characteristic based on analysis the parameters of Gabor wavelet sufficiently is introduced. A feature points collection is structured according to figure parameters with energy function. Adaptive nonlinear filter is proposed to overcome the trap of traditional statistical model Kalman filter, which can reduce much time on calculating. The simulation and experiment show that it has well capacity of recognizing figure target and can be applied to all vision tracking system.

Key words: Gabor wavelet; Target tracking; Parameters of Gabor; Kalman filter

1 引 言

运动目标的跟踪技术对系统的实时性和识别精度有较高的要求^[1]. 在过去的 20 多年里, 目标跟踪与识别一直是非常活跃的研究领域. 其应用包括导弹的地形和地图匹配、飞机导航、武器投射系统的未制导、光学和雷达的图像跟踪、工业流水线的自动监测等.

Gabor 小波是利用 Gabor 函数推导得到的. Gabor 函数是唯一能够达到时频测不准关系下界的函数, 它能够最好地兼顾信号在时域和频域中的分辨能力. Gabor 函数形成的 2D Gabor 滤波器有着优良的滤波器性能, 并有着与生物视觉系统相近的特点. 它具有易于调谐的方向、径向频率带宽和中心频率.

对于 Gabor 小波尺度和方向参数的选取, 目前在频率域和空间域都具有很好的局部性, 从而被广

泛用于图像处理、理解和识别等领域, 但如何选取参数, 目前还没有确定的方法. 文献[2]采用实验方法确定参数, 这种方法可以很好地确定每幅图像最佳的 Gabor 参数, 但是在应用时需要做大量的实验以确定最佳的参数且易受外界干扰. 文献[3]应用较为广泛的一种方法, 称其为参数组合法. 其具体方法是选择 8 个方向参数, 5 个尺度参数, 组成 40 个 Gabor 滤波器以期覆盖所有参数. 文献[4]采取一种参数寻优的方法, 利用最小二乘法寻找最优的 Gabor 小波参数, 但其无法发挥出 Gabor 小波的多尺度特性.

本文给出一种新的提取 Gabor 参数的方法, 该方法利用 Gabor 小波参数特性, 配合能量函数构成图像的特征点集合, 同时配合自适应非线性滤波算法以增强算法的实用性.

2 Gabor 小波分析

Gabor 函数是由椭圆形的高斯函数和复平面波

收稿日期: 2006-11-10; 修回日期: 2007-01-15.

基金项目: 哈尔滨市留学回国人员基金项目(2004AFLXJ009).

作者简介: 邢卓异(1980—), 男, 哈尔滨人, 博士生, 从事控制系统设计、智能图像处理等研究; 朱齐丹(1963—), 男, 哈尔滨人, 教授, 博士生导师, 博士, 从事人工智能、机器人等研究.

的乘积组成,其 Gabor 核函数二维表达式为

$$\begin{aligned}
 (x) = & \frac{K_v}{2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{K_v X^2}{2^2}\right)\right] \times \\
 & \left\{\exp[iKX] - \exp\left(-\frac{2}{2}\right)\right\}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中: σ 为高斯函数的标准差; X 为滤波位置,即对 X 处作滤波; 一般可以设定为 $\frac{1}{2}$ 的常量, $\exp\left(-\frac{2}{2}\right)$ 是直流分量,由于去掉了直流分量,故 Gabor 滤波器对局部光照影响不敏感; $K = \begin{bmatrix} K_v \cos \theta & 0 \\ K_v \sin \theta & 0 \end{bmatrix}$, θ 为方向参数, k_v 为尺度参数.

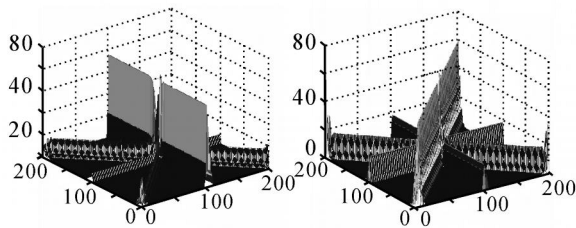
这里分别以米字形图和“lena”为例,分析其方向和尺度参数的作用,如图 1 所示.



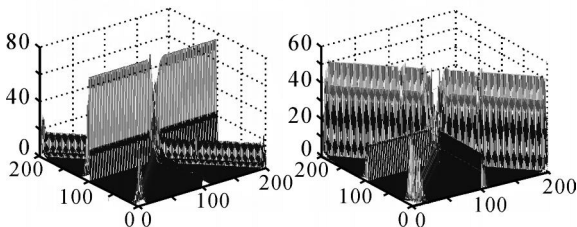
(a) 米字形图 (b) lena

图 1 原 图

图 2 是方向参数分别选取 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 后,图 1(a) 经过 Gabor 滤波器后的效果图;图 3 为大小不同尺度参数作用下图 1(b) 经过滤波器后的效果图.



(a) 方向参数为 0° (b) 方向参数为 45°



(c) 方向参数为 90° (d) 方向参数为 105°

图 2 Gabor 滤波器四方向滤波

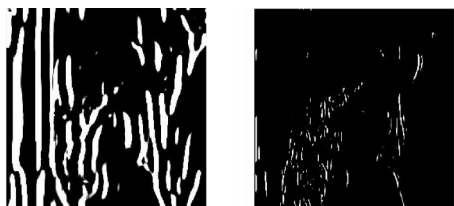


图 3 Gabor 滤波器多尺度滤波对比

由图 2 可知, Gabor 小波的方向参数可以理解 为指定方向的“窄带”滤波器,即方向参数描述了图 像不同方向的灰度信息.

从图 3 可以发现,大尺度参数的 Gabor 滤波器 可以描述全局性较强的信息,较利于提取图像的“概 貌”;而小尺度参数的 Gabor 滤波器则对图像的“细 节”信息比较敏感,有利于提取图像的“细节”.

3 特征点的提取与选择

定义图像的 Gabor 小波变换如下:

$$W(X, k_v, \theta) = f(X), (X, k_v, \theta). \quad (2)$$

其中: $W(X, k_v, \theta)$ 为图像的 Gabor 变换, $f(X)$ 代 表所要处理的图像, (X, k_v, θ) 为 Gabor 核函数, k_v 和 θ 如前定义.

定义特征点集合如下:

$$\begin{aligned}
 (X) = & [T_1(x, w_1^*), T_2(x, w_2^*), \dots, \\
 & T_i(x, w_i^*), \dots, T_M(x, w_M^*)], \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$T_i(x, w_i^*) = \underset{0}{\text{Min}}(J_i(X, k_v, w_i^*)),$$

$$\theta = \mu \frac{\pi}{K}, \mu = 0, 1, \dots, K. \quad (4)$$

定义表征图像信号 $f(X)$ 在点 X 处的多尺度间 Gabor 变换的特征的能量函数为

$$\begin{aligned}
 J_i(X, k_v, w_i^*) = & \\
 W(X, k_v^i, w_i^*) - (k_v^i, k_v^{M-i}) W(X, k_v^{M-i}, w_i^*) & . \quad (5)
 \end{aligned}$$

其中: $k_v^i = 2^{\frac{i-1}{M-1}}$, $i = 0, 1, \dots, M$; (k_v^i, k_v^{M-i}) 是权重 函数,这里选用

$$(k_v^i, k_v^{M-i}) = e^{-(k_v^i - k_v^{M-i})}. \quad (6)$$

由式(5)可知,所计算的特征点是利用大小不 同尺度参数,配合相应的权重函数,通过式(4)计算 出相应的方向参数,构成图像的特征点集合.这不但 充分利用了 Gabor 小波变换中的尺度参数,而且通过 寻优的方式找到合适的方向参数,称其为遍历寻 优法.这种方法既避免了单纯参数寻优所带来的不 能发挥 Gabor 特性的问题,同时避免了参数组合法 所带来的巨大的计算量.

定义模板图像的特征向量为

$$\begin{aligned}
 (X) = & [T_1(x, w_1^*), T_2(x, w_2^*), \dots, \\
 & T_i(x, w_i^*), \dots, T_M(x, w_M^*)]. \quad (7)
 \end{aligned}$$

定义候选图像的特征向量为

$$\begin{aligned}
 (X) = & [T_1(x, w_1^*), T_2(x, w_2^*), \dots, \\
 & T_i(x, w_i^*), \dots, T_M(x, w_M^*)]. \quad (8)
 \end{aligned}$$

定义图像匹配函数为

$$\begin{aligned}
 R_f = & \min / (x) - (x) / = \\
 & \min_{i=0}^M (|T_i(x, w_i^*) - T_i(x, w_i^*)|). \quad (9)
 \end{aligned}$$

对于两幅图像,模板图像的特征向量为 (X) , 候选图像的特征向量为 (X) . 特征匹配算法可以描述如下:

1) 如果首次搜索,对候选图像进行全局搜索,确定模板图像,计算模板图像的特征向量,然后转入步骤3);

2) 如果不是首次搜索,则可利用卡尔曼算法预测一个搜索区域后(假定模板图像大小为 $N_1 \times N_2$, 则搜索区域可以定义为以预测算法预测的目标点位置为中心,大小可定义为4倍模板大小,对搜索区域内求取其特征向量),转入步骤3);

3) 计算搜索区域图像的特征向量,按式(9)所定义的图像匹配相关函数,转入步骤2).

文中所提方法,虽然较文献[3]所述方法有所改进,所用时间有大幅提高,但由于利用 Gabor 小波提取图像特征点序列后,需对图像进行匹配计算,算法的计算量仍然很大,所用时间仍然较长.这里采用一种改进的卡尔曼滤波算法进行预测,以缩短算法耗时.

4 基于统计模型的自适应非线性滤波算法

基于统计模型的卡尔曼滤波^[11,12]将 Singer 模型^[13]中加速度均值零改进为自适应加速度均值,认为目标下一时刻的加速度只能在当前加速度的邻域内,使得跟踪精度和性能得到较大提高,因此得到广泛应用.但统计模型跟踪算法存在如下缺陷:

1) 统计模型跟踪算法中,从仿真和试验中可以发现位置存在误差累计.这是由于量测方程 $Z_k = H_k X_k + V_k$, 仅对量测方程取了泰勒级数展开的一次项,引入了线性化误差.如不进行线性处理,那么实际的量测方程为

$$Z_k = H_k X_k + V_k + H.O.T, \quad (10)$$

H.O.T代表泰勒展开高次项之和.显然,H.O.T为线性化所带来的误差.当系统的测量误差不等于零时,线性化所带来的误差必须加以补偿.同时在算法中是假设误差的均值为零,而实际的测量噪声均值不一定等于零,那么不精确噪声方差阵所造成的误差也必须加以补偿.

2) 统计模型虽然能反映实际被跟踪物体的运动趋势,但当被跟踪物体的加速度超过事先设定的上限加速度 A_{\max} 和下限加速度 $A_{-\max}$ 时,预测值出现明显的跳变,其预测效果明显变坏.当目标发生状态突变时, A_{\max} 和 $A_{-\max}$ 在跟踪过程中不能自适应调整,使得系统噪声方差 Σ_a 调整能力有限,因此不能保证跟踪过程中保持较高的跟踪精度,这就导致算法的性能变差.当系统进入稳态时,其预测误差的协方差 $P_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + Q_{k-1}$ 趋于极小值,使

得增益 $K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1}$ 也趋于极小,并导致残差增大;而 K_k 和 $P_{k/k-1}$ 不能随之改变,从而丧失对突变状态的跟踪能力.

如上所述,如直接采用基本的统计模型卡尔曼滤波算法,会出现预测偏差,甚至出现预测失败,故必须对算法进行改进.

针对统计模型算法所存在的不足,结合强跟踪滤波器思想,给出如下改进方法:

针对实际的测量噪声均值不等于零,而等于线性化误差的均值,定义

$$\mu_k = E[V_k], \quad R_k = \text{var}V_k. \quad (11)$$

由于跟踪目标的真实位置是未知的,只能根据最小均方差的规则,求出基于过去测量序列的测量误差的条件均值的条件方差,即

$$\mu_k = E[\mu(x, x_v, x_a) | Z_k] = \begin{bmatrix} \frac{|z_s(k) - \hat{x}_s(k)|}{2} \cdot [(z_v - \hat{x}_v)^2 - \frac{2}{v} + (z_a - \hat{x}_a)^2 - \frac{2}{a}] \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$R_k = E[R(x, x_v, x_a) | Z_k] = \begin{bmatrix} \frac{2}{s} + \frac{(z_s(k) - \hat{x}_s(k))^2 \cdot (\frac{4}{v} + \frac{4}{a})}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{v} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{a} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

重新定义残差

$$r_k = Z_k - H_k X_{k/k-1} - \mu_k, \quad (14)$$

噪声 W_k 的方差

$$R_k = R_k. \quad (15)$$

先引入归一化因子,设对角阵

$$= \text{diag}(1, 2, \dots, m), \quad (16)$$

其中 $1, 2, \dots, m$ 为根据系统先验输出值确定大小关系,近似满足 $1:2:\dots:m \quad z_1:z_2:\dots:z_m$.

引入渐消因子 (k) , 则归一化渐消因子

$$(k) = \begin{cases} (k) \cdot^{-1}, & (k) > 1; \\ 1, & (k) = 1. \end{cases} \quad (17)$$

要求

$$\frac{1}{1} (k) + \frac{2}{2} (k) + \dots + \frac{m}{m} \frac{2}{1} + \frac{2}{2} + \dots + \frac{2}{2}.$$

由于 $(k), k = 1, 2, \dots, m$, 是无法预知的,但可通过先验知识获取一组输出值 $\tilde{z}_1, \tilde{z}_2, \dots, \tilde{z}_m$, 即

$$\tilde{z}_1^2 + \tilde{z}_2^2 + \dots + \tilde{z}_m^2 \quad \frac{\tilde{z}_1^2}{1} + \frac{\tilde{z}_2^2}{2} + \dots + \frac{\tilde{z}_m^2}{m}. \quad (18)$$

归一化后各分量基本相等,即

$$\frac{\tilde{z}_1^2}{1} = \frac{\tilde{z}_2^2}{2} = \dots = \frac{\tilde{z}_m^2}{m}. \quad (19)$$

由式(18)和(19)可得

$$i = \tilde{z}_i \sqrt{\frac{m}{N_{z_1} + z_2 + \dots + z_m}}, i = 1, 2, \dots, m. \quad (20)$$

这样,由式(20)可以确定归一化因子.

渐消因子

$$(k) = \frac{\text{tr}[N(k)]}{\text{tr}[M(k)]}, \quad (21)$$

其中

$$N(k) = v_k - R_k - H_k \Phi_{k-1} Q_k^T H_k^T, \\ M(k) = H_k \Phi_{k-1} P_k \Phi_{k-1}^T H_k^T.$$

v_k 是残差方差矩阵,有

$$v_k = E(r_k r_k^T) = \begin{cases} r(1) r^T(1), & k = 0; \\ \frac{v_{k-1} + r_k r_k^T}{1 + \lambda}, & k = 1, \dots, L. \end{cases}$$

为弱化因子,为遗忘因子^[14], $0 < \lambda < 1$,一般取

$\lambda = 0.95$, $r(1)$ 是初始残差.

重新定义噪声协方差和系统增益矩阵如下:

$$P_{k/k-1} = \Phi_{k-1} P_{k-1} \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1}, \quad (22)$$

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1}. \quad (23)$$

设 r_k 为残差 k 时刻的统计平均偏差,有

$$r_k = \frac{\sqrt{r_k^2 + r_{k-1}^2 + \dots + r_{k-L+1}^2}}{L}. \quad (24)$$

L 为状态偏差统计平均长度, L 的求取可遵循皮而森准则.

机动加速度方差自适应关系调整如下:

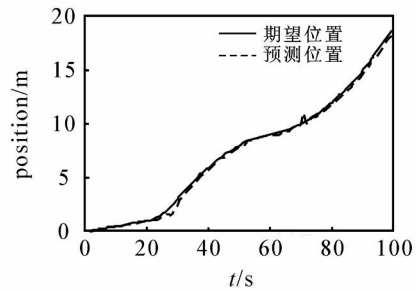
$$\lambda = \begin{cases} \frac{4}{4} (A_{\max} - \hat{\alpha}_a)^2, & \hat{\alpha}_a > 0, \\ \frac{4}{4} (A_{\max} + \hat{\alpha}_a)^2, & \hat{\alpha}_a < 0, \\ \frac{4}{4} (r_k - \bar{r}_k)^2, & k > L. \end{cases} \quad 0 < k < L; \quad (25)$$

按照统计模型所建立的状态方程和量测方程,采用如下算法进行处理:

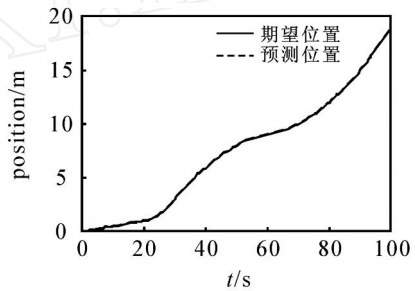
$$r_k = Z_k - H_k X_{k/k-1} - \mu_k, \\ X_k = X_{k/k-1} + K_k r_k, \\ X_{k/k-1} = \Phi_{k-1} X_{k-1} + U_k \bar{a}_k, \\ K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1}, \\ P_{k/k-1} = \Phi_{k-1} P_{k-1} \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1}, \\ P_k = (I - K_k H_k) P_{k/k-1}. \quad (26)$$

假设系统以如下状态运行: $A_{\max} = 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$, $A_{\min} = -0.5 \text{ m}^2/\text{s}$, $x(0) = 3 \text{ m}$, $\dot{x}(0) = 5 \text{ m/s}$, $\ddot{x}(0) = 0 \text{ m}^2/\text{s}$ 的初始状态,以 5 m/s 的速度匀速运动 20 s , $21 \sim 30 \text{ s}$ 期间以 $a = 3.0 \text{ m/s}^2$ 加速运行, 31

$\sim 60 \text{ s}$ 期间以 $a = -1.0 \text{ m/s}^2$ 减速运行, $61 \sim 100 \text{ s}$ 期间以 $a = 1.0 \text{ m/s}^2$ 加速运行.



(a) 基本统计模型算法



(b) 改进算法

图 4 基本统计模型与改进算法仿真对比

由仿真结果图 4 和表 1 分析可知:基于统计模型的自适应非线性滤波算法对位置、速度和加速度能够比较理想地预测出被跟踪物体的运动状态.较统计模型跟踪算法,其误差能够减少 1 个数量级.同时,在运动状态发生突变的过程,预测结果仍然比较理想,较统计模型跟踪算法发生的突变,有明显的改善.

表 1 统计模型试验结果

误差方差	基本统计模型算法	本文所改进算法
位置	133.384 1	12.199 6
速度	4.355 1	0.016 7
加速度	0.631 0	0.008 2

5 算法仿真

图 5 和表 2 验证了算法的有效性.图 5(a) 为模板图像,图 5(b) 为本文所提方法匹配效果图,利用



(a) 模板图像

(b) 匹配结果

图 5 算法仿真

表 2 图像匹配实验

所用 Gabor 方法	算法耗时/s
文献[3]所用方法	78.4
遍历寻优法	43.6
组合法	1.2

了组合寻优法与自适应非线性滤波结合的方法(这里称其为组合法).表 2 为算法匹配时间.

6 结 语

本文介绍的小波跟踪方法是一种根据小波特征进行自动跟踪的方法,根据 Gabor 小波的特点和特性,给出了一种新的参数选择方法.该方法充分利用大小不同尺度参数,配合相应的权重函数,寻优计算出相应的方向参数,构成图像的特征点集合.同时配合基于统计模型的自适应非线性滤波算法,使得利用小波进行目标跟踪的方法在算法耗时的问题上有了大幅度的提高.实验和仿真表明,本文所提算法可广泛应用于各种图像目标识别与跟踪的系统中,算法具有良好的目标识别功能.

参考文献(References)

- [1] Bretzner L, Lindeberg T. Feature tracking with automatic selection of spatial scales[J]. CVIU, 1998, 71: 385-392.
- [2] 赵英男,刘正东,杨静宇.基于 Gabor 滤波器和特征加权的红外图像识别[J].计算机工程与应用,2004,40(32):22-24.
(Zhao Ying-nan, Liu Zheng-dong, Yang Jing-yu. Recognition for infrared images based on Gabor filters and feature weighting[J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(32): 22-24.)
- [3] 颜蒋国,潘立登.基于 Gabor 小波的人脸特征点跟踪方法[J].计算机应用,2004,24(7):50-51.
(Yan Jiang-guo, Pan Li-deng. Tracking facial feature with Gabor wavelet [J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 24(7): 50-51.)
- [4] 董学志,宋建中,韩广良.一种利用 Gabor 小波特征的目标跟踪方法[J].光学技术,2003,29(7):484-486.
(Dong Xue-zhi, Song Jian-zhong, Han Guang-liang. Target tracking method using wavelet feature [J]. Optical Technique, 2003, 29(7): 484-486.)
- [5] Bishop B, Hutchinson S, Spong M. Camera modelling for visual servo control applications[J]. Mathematical and Computer Modelling, 1996, 24(5): 79-102.
- [6] 李厚强,王超,叶中付,等.一种改进的基于 Gabor 滤波器的纹理分割方法[J].电路与系统学报,2003,8(6):82-86.
(Li Hou-qiang, Wang Chao, Ye Zhong-fu, et al. An improved method for texture segmentation based on Gabor filters[J]. J of Circuits and Systems, 2003, 8(6): 82-86.)
- [7] Antoine J, Carrette P, Murenzi R, et al. Image analysis with two-dimensional continuous wavelet transforms [J]. Signal Processing, 1991, 31(3): 241-272.
- [8] Antoine J. The space-angle representation in image analysis with 2D wavelet transform[J]. Signal Processing, 1992, 25(4): 701-704.
- [9] Mehrotra R. Gabor filter-based edge detection [J]. Pattern Recognition, 1992, 25(12): 1479-1494.
- [10] Krunger V, Sommer G. Gabor wavelet networks for object representation [R]. Kiel: University of Kiel, 2000.
- [11] Li X R, Jilkov V P. Survey of maneuvering target tracking — Part I: Dynamic models[J]. IEEE Trans on Aerospace Electronic System, 2003, 39(4): 1333-1364.
- [12] 周宏仁,敬忠良,王培德.机动目标跟踪[M].北京:国防工业出版社,1991:134-176.
(Zhou Hong-ren, Jing Zhong-liang, Wang Pei-de. Tracking mobile object[J]. Beijing: National Defence Industry Press, 1991: 134-176.)
- [13] Singer R A. Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering targets[J]. IEEE Trans on Aerospace Electronic System, 1970, 6(4): 473-483.
- [14] Chan Y T, Hu A G C, Plant J B. A Kalman filter based tracking scheme with input estimation[J]. IEEE Trans on Aerospace Electronic System, 1979, 15(2): 237-244.